

1 Einleitung

In der heutigen Zeit gewinnen Anzeigeelemente als Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine einen immer größeren Stellenwert. Die Anforderungen an derartige Displays sind vielseitig und die Anwendungsgebiete für den Einsatz von einfachen Anzeigeelementen bis hin zu großflächigen Vollfarbdisplays wuchsen in unserer multimedialen Gesellschaft in der letzten Dekade sprunghaft an. Bildschirme sind komplexe elektrovisuelle Schnittstellen zum Betrachter und dementsprechend umfangreich sind die Kennzeichen und Eigenschaften für ein Display [1]. Für den Betrachter sind primär folgende Eigenschaften von Belang:

- Kontrast
- Helligkeit
- Bildwiederholgeschwindigkeit
- Auflösung
- Füllfaktor
- Farbreinheit und -tiefe
- Defektdichte

Weitere wichtige Charakteristika, die für den Einsatz eines Displaytyps in einer bestimmten Umgebung entscheidend sind, sollen im Folgenden nur kurz angerissen werden, da es noch eine Vielzahl von zusätzlichen Anforderungen gibt:

- Herstellungskosten und Verkaufspreis
- Temperaturbereich bei Lagerung und Betrieb
- Lebensdauer

- Energieverbrauch
- Ablesbarkeit bei Umgebungslicht
- Gewicht und Größe (Bilddiagonale und Einbautiefe)

Anhand der Vielzahl von Parametern wird deutlich, dass eine einzige Bildschirmtechnik allein den Anforderungen nicht gerecht werden kann. Als Folge haben sich in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlicher Displaytechnologien mit verschiedenen Zielsetzungen entwickelt, die in den letzten Jahren zum Teil als Produkt auf den Markt gekommen sind oder in der Zukunft ein viel versprechendes Potential für eine Position auf dem hart umkämpften Displaymarkt haben. Um die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit anschaulich zu machen, werden erstens die Entwicklung des Displaymarktes und zweitens die grundsätzlichen Funktionsprinzipien der verschiedenen OLED-Displays erläutert.

1.1 Entwicklung des Displaymarktes

Die Kathodenstrahlröhre (engl. Cathode-Ray Tube (CRT)) erfährt in der heutigen medialen Welt einen steigenden Konkurrenzkampf seitens der Flachbildschirme (engl. Flat Panel Display (FPD)) [2]. Auf vielen klassischen Anwendungsgebieten (TVs, Computermonitore etc.) der CRTs ist eine steigende Verdrängung beispielsweise durch großflächige TFT-LC-Displays (engl. Thin-Film Transistor Liquid-Crystal Display), Projektionssysteme und Plasmadisplays (engl. Plasma Display Panel (PDP)) zu beobachten. In den letzten sechs Jahren zeigt sich eine Stagnation bei den Verkaufszahlen der CRTs (Bild 1.1). Im Gegensatz dazu steht das rasche Anwachsen des LCD-Marktes (Bild 1.1). Für die nächsten fünf Jahre wird dem gesamten Flachbildschirmmarkt ein Wachstum von weit über 50 % prognostiziert (Bild 1.2) [1]. Neben den schon weit verbreiteten LC-Displays gewinnen in den letzten Jahren mit der Umsetzung der Forschungsergebnisse, dem Prozess-Engineering und neuen Materialien auch weitere Flachbildschirmtechnologien einen wachsenden Anteil auf dem Displaymarkt, wie die anorganischen Leuchtdioden (engl. Light Emitting Diode (LED)), organischen Leuchtdioden (engl. Organic Light Emitting Diode (OLED)), Plasmadisplays, Vakuum-Fluoreszenz-Displays (engl. Vacuum Fluorescent Display (VFD)) und Dünnschicht-Elektrolumineszenz-Displays (engl. Thin Film Electroluminescence (TFEL)). Dank neuer Displaytechnologien erweitert sich das Anwendungsgebiet gerade für portable Displays mit hoher Auflösung und sinkendem Energieverbrauch. Mobiltelefone, Handheld-Computer (engl. Personal Digital Assistant (PDA)) und Laptops gehören zu den bekanntesten Anwendungen, deren Durchbruch durch die FPDs erst möglich wurde. Auf Grund der gestiegenen

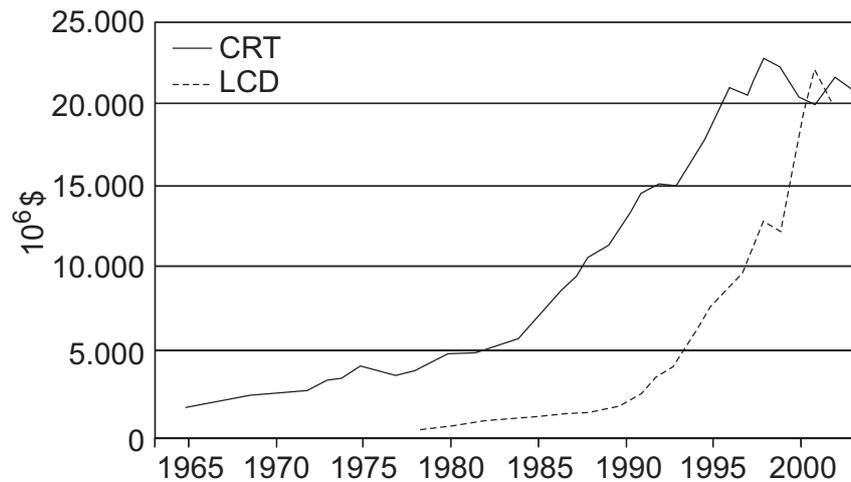


Bild 1.1: Marktentwicklung der CRTs und LCDs in den letzten 40 Jahren [1]

Qualität der graphischen Darstellung entwickeln sich laufend neue Produkte, z.B. UMTS-Mobiltelefone und PDAs, Camcorder und hochwertige Anzeigemodule im Automobil. Durch die Erfüllung der Anforderungen nach einem geringen Energieverbrauch und nach Gewichts- und Platzersparnis bei verbesserter Bildqualität finden FPDs zunehmend eine hohe Akzeptanz beim Verbraucher. Durch die steigende Nachfrage der FPDs wird laut Studien von Stanford Resources der Marktanteil der CRTs von ca. 65% im Jahr 2001 auf 35% im Jahr 2007 zurückgehen (Bild 1.2). Auch weiterführende Ansätze hin zu flexiblen Displays für neuartige Anwendungen stärken das zukünftige Wachstum der Flachbildschirme [1]. Neben den

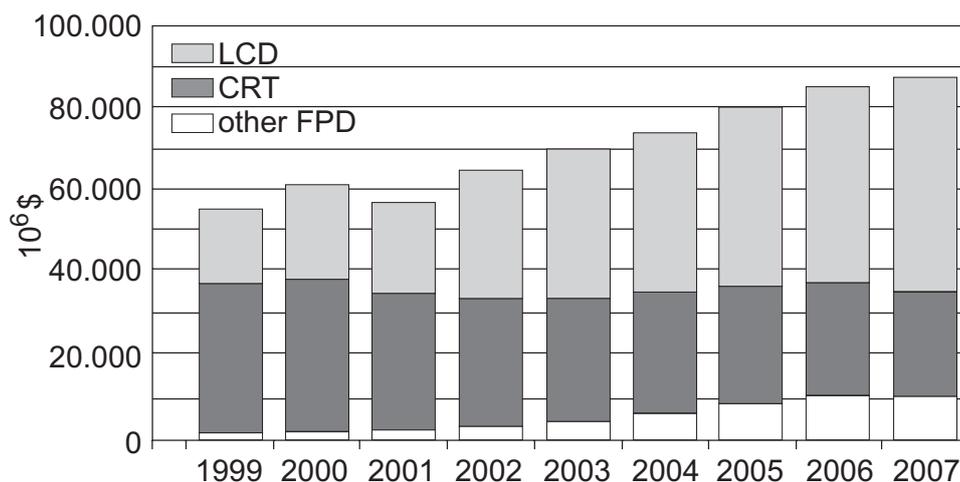


Bild 1.2: Zukünftige Marktentwicklung der CRTs, LCDs und weiterer FPDs [1]

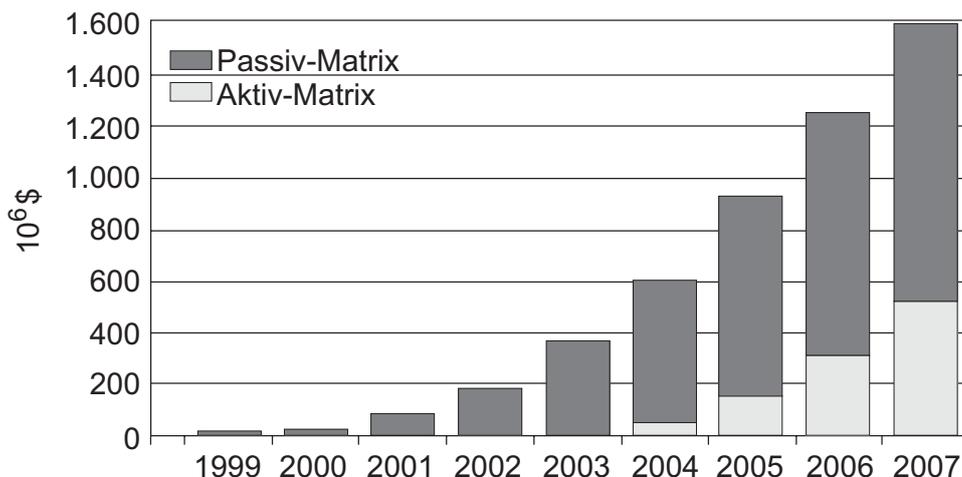


Bild 1.3: Prognose für die Marktentwicklung organischer Displays [3]

LCDs wird den organischen Displays ein sprunghafter Markteinstieg prognostiziert. Hierbei sollen in den nächsten Jahren die passiv angesteuerten Displays den größten Marktanteil haben (Bild 1.3) [3].

1.2 Organische Elektrolumineszenzdisplays

Kaum eine Elektronikentwicklung hat in den letzten Jahren so eine stürmische Entwicklung hinter sich wie die der OLEDs und der mit ihnen realisierten Displays. Organic Light Emitting Diode steht dabei als Sammelbegriff für zwei unterschiedliche Konzepte: Die „Small Molecule OLED“ (SM-OLED) und die Polymer-OLED (P-OLED). Die Schichten der SM-OLEDs werden z.B. durch Sublimation im Vakuum deponiert und bleiben als niedermolekulare Verbindung im Dünnsfilm erhalten. Im Gegensatz dazu werden die aktiven Schichten einer P-OLED aus einem Polymerfilm gebildet, der in den meisten Fällen aus einer Lösung von konjugierten Molekülketten aufgebracht wird und sich in der Regel anschließend bei der Trocknung vernetzt [4].

1.2.1 Elektrolumineszenz

In ihrer grundsätzlichen Funktion unterscheiden sich die Polymer- und Monomerdioden nicht, beide beruhen auf der Elektrolumineszenzstrahlung von organischen Materialien. Die Elektrolumineszenz bei organischen Halbleitern läuft physikalisch betrachtet in vier Schritten ab

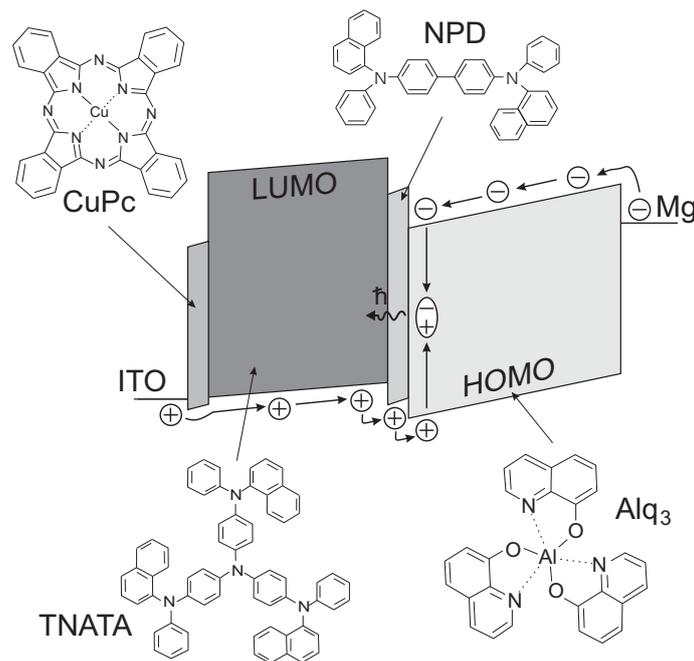


Bild 1.4: Verwendete OLED-Materialien und das Bänderdiagramm einer undotierten OLED

und umfasst: Die Injektion von Elektronen und Löchern, den Transport der Ladungsträger, die Bildung von Paaren aus Elektronen und Löchern (Exzitonen) und die strahlende Rekombination der Ladungsträgerpaare [5].

Am Beispiel einer typischen undotierten Heterostruktur einer SM-OLED soll kurz das Prinzip der Elektrolumineszenz aufgezeigt werden (Bild 1.4). Bei konventionellen OLEDs wird das Licht aus dem Substrat ausgekoppelt. Hierfür wird das Bauelement auf ein mit Indium-Zinn-Oxid (ITO) beschichtetes Glasträger aufgebracht. Neben der Lichtauskopplung übernimmt der transparente ITO-Kontakt mit seiner hohen Austrittsarbeit als Anode die effiziente Injektion der Löcher. Die organischen Schichten werden zur Steigerung der Effizienz in mehreren Filmen (Heterostruktur; [6, 7]) mit einer Löcherinjektionsschicht (Kupferphthalocyanin; CuPC), zwei Löchertransportschichten (4,4',4''-Tris(N-(1-naphtyl)-N-phenyl-amino)-triphenylamin (1-TNATA), N,N'-Diphenyl-N,N'-bis(1-naphtyl)-1-1'biphenyl-4,4'-diamin (NPD)) und einer Elektronenleiter- und Emissionsschicht (Aluminium 8-Hydroxychinolat (Alq₃)) aufgebaut. Abschließend wird ein Metall (z.B. Mg) mit einer geringen Austrittsarbeit als Kathode auf den Elektronenleiter aufgebracht. Durch das Anlegen einer ausreichenden Spannung (>3 bis 5V) zwischen die Kontakte der Diode, werden Elektronen aus der Kathode und Löcher aus der Anode in die organischen Dünnschichten injiziert. Für eine

Organische Materialien	HOMO (IP) [eV]	LUMO (EA) [eV]	Anorganische Materialien	Austrittsarbeit [eV]
CuPC	5,2	~ 3,4 [10]	Mg	3,64 [14]
TNATA	5,1	~ 1,9 [11]	Al	4,25
NPD	5,5	~ 2,3 [12]	Ag	4,3
Alq ₃	5,8	~ 3,1 [13]	ITO	4,7...5,1 [15, 16, 17, 18]

Tabelle 1.1: Energieniveaus und Austrittsarbeiten von in OLEDs verwendeten Materialien

balancierte Injektion muss sowohl der Löcherleiter mit seinem Ionisationspotential (IP) als auch der Elektronenleiter mit seiner Elektronenaffinität (EA) an die Anode (ITO) bzw. Kathode (z.B. Mg o. Ca) angepasst sein [8, 9]. Durch das anliegende Feld werden die Ladungsträger jeweils zur gegenüberliegenden Elektrode transportiert. Die Löcher gelangen dank der geringen Barrieren der Ionisationspotentiale (auch Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO)) leicht in die Emissionsschicht, während die Elektronen an der größeren Energiebarriere der Löchertransportschicht (auch Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO)) geblockt werden (Tabelle 1.1). Die so akkumulierten Elektronen können somit effizient mit den in die Emmissionsschicht injizierten Löchern Exzitonen bilden, die teilweise strahlend rekombinieren.

Das Spektrum der Elektrolumineszenz wird durch das Emittermaterial bestimmt, welches wiederum durch die Rekombinationszone festgelegt wird. Die organischen Leuchtdioden verhalten sich bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften wie die anorganischen Dioden (Bild 1.5). In Vorwärtsrichtung steigt ab der Einsatzspannung mit Einsetzen der Elektrolumineszenz (typ.: 2,5 bis 4 V) der elektrische Strom an. Wird die Diode in Sperrichtung betrieben, weist sie, wie in Bild 1.5 dargestellt, eine stabile Sperrcharakteristik auf. Die Anzahl der injizierten Ladungsträger bestimmt die Stromdichte. Bei einer ausgeglichenen Injektion von Elektronen und Löchern steigt die Leuchtdichte mit der Stromdichte über mehrere Dekaden proportional an.

1.2.2 Passive und aktive OLED Displays

Die Unterscheidung „passiv“ und „aktiv“ bei organischen Displays ist vergleichbar mit den Bezeichnungen in der LCD-Technologie und bezieht sich auf die Art der Pixelansteuerung. Der schematische Aufbau eines organischen Passiv-Matrix-Displays ist in Bild 1.6 dargestellt [19]. Die Anoden und Kathoden werden als gekreuzte Streifen ausgelegt und durch die

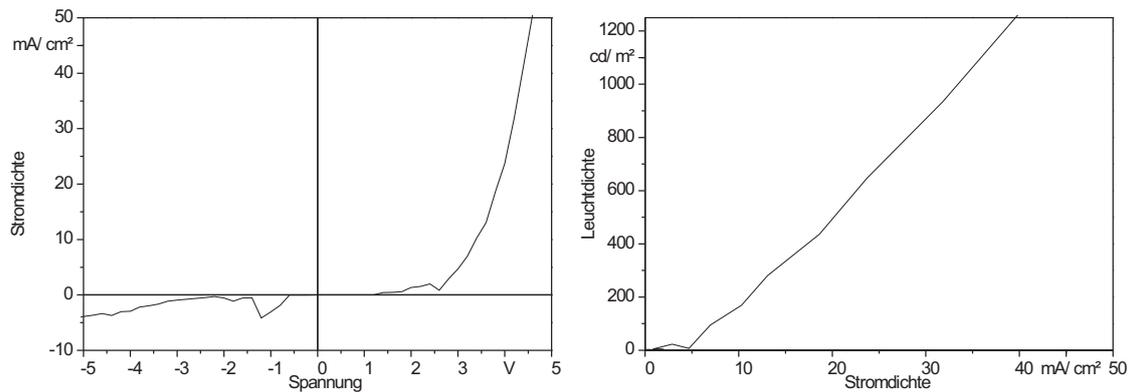


Bild 1.5: I/U– und P/I–Kennlinien einer undotierten organischen Leuchtdiode
(Schichtenfolge: CuPC: 50 Å; TNATA: 500 Å; NPD: 50 Å; Alq₃: 600 Å)

organischen Dünnschichten voneinander getrennt. Die Pixel werden direkt über die Spalten und Zeilen angesteuert [20]. Wegen der Diodencharakteristik wird beim Anlegen einer Spannung an eine Zeile und Spalte nur die Diode im Schnittpunkt der beiden Bahnen in Vorwärtsrichtung betrieben und die übrigen Pixel in Sperrrichtung (Bild 1.7). Über das so genannte Multiplexverfahren kann zeilenweise Spalte für Spalte angesprochen und die Information auf dem Bildschirm dargestellt werden. Die Anzahl der Zeilen und Spalten von Passiv-Matrix-Displays ist auf wenige 100 begrenzt, da sonst die organischen Dünnschichten durch den Multiplexbetrieb für eine geforderte mittlere Leuchtdichte von min. 100 cd/m^2 bei sehr hohen Spitzenhelligkeiten betrieben werden müssten, wodurch die Lebensdauer der Dioden stark reduziert würde.

Bei der aktiven Ansteuerung (Bild 1.8) werden mindestens zwei, häufig vier Steuertransisto-

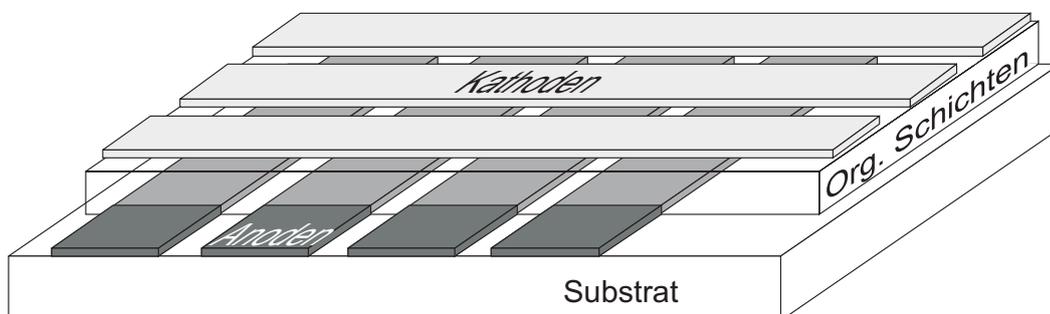


Bild 1.6: Schematischer Aufbau eines organischen Passiv-Matrix-Displays

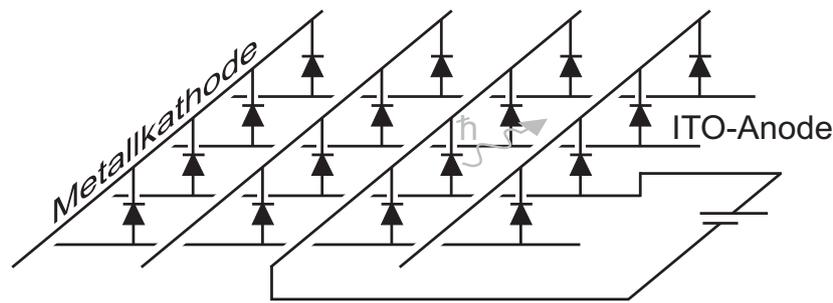


Bild 1.7: Funktionsweise eines Passiv-Matrix-Displays

ren und ein Kondensator zur Speicherung des Bildinhalts in jeden Pixel integriert [21, 22]. Anstatt wie beim passiven Display einen großen Strompuls direkt auf den Pixel zu geben, wird bei der aktiven Ansteuerung der Kondensator über einen Transistor (T1 bzw. T1'–T3') durch einen schwachen Strompuls aufgeladen und die gespeicherte Ladung über einen längeren Zeitraum über den zweiten Transistor (T2 bzw. T4') an die Diode abgegeben. Bei niedrigen Leuchtdichten arbeiten die Aktiv-Matrix-Displays viel effizienter und Pixeldefekte können fast unmerklich für den Betrachter über die Ansteuerung unterdrückt werden. Hiermit lassen sich somit Helligkeit und Kontrast zusätzlich weiter steigern und die Pixelanzahl ist nicht mehr begrenzt [4]. Jedoch die Herstellungsprozesse sind komplexer, so dass sich der erheblich größere Aufwand im visuellen Ergebnis für „Low-Information-Content“-Displays widerspiegelt und sich somit preislich nicht rechtfertigt.

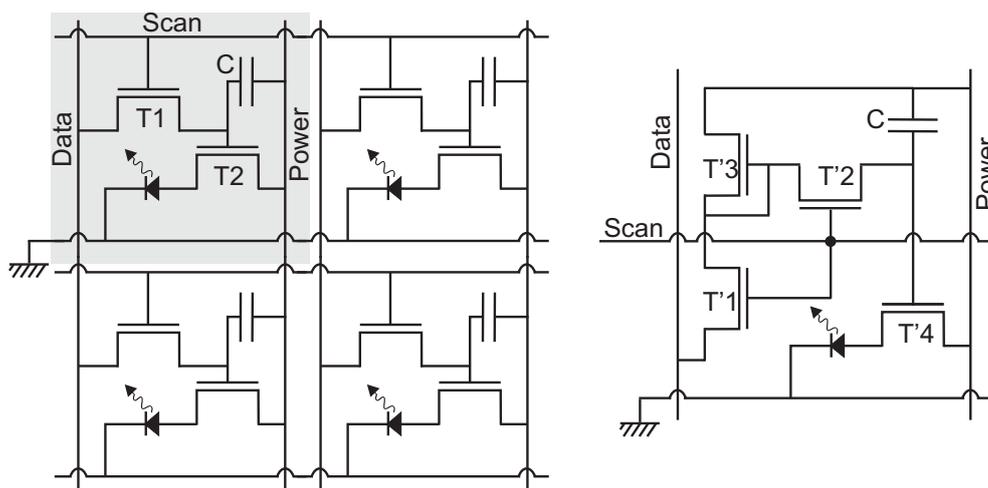


Bild 1.8: Elektronischer Aufbau eines Aktiv-Matrix-Displays mit 2 (T1, T2) bzw. 4 (T1'–T4') Transistoren